

КОНЦЕПЦИЯ РЕВЕРСИВНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

CONCEPT OF HEAT TREATMENT AND REVERSED HOT STRIP ROLLING OF MAGNESIUM

Nam, Alexander^{1,2)}, Kawalla, Rudolf^{1,2)}, Zinoviev, Alexander²⁾

- 1- TU Bergakademie Freiberg, Institute of metalforming, Freiberg, Germany
- 2- NUST MISIS, Department of metal forming of special alloys, Moscow, Russia
aleksandr.nam@imf.tu-freiberg.de / rudolf.kawalla@imf.tu-freiberg.de

Abstract

The production of magnesium strips, based on a twin-roll casting (TRC) and Hot Strip Rolling, has a promising application especially in automobile industry. Recently, the TRC line extends by further rolling mills to produce strips with fewer thicknesses. The additional rolling requires re-heating of the TRC strip coil to improve the deformation properties. The heating process affects the microstructure and final properties of the strips. Therefore, it is important to control the heat treatment process. The aim of this study is to create a bundle of models to calculate the temperature development in process of magnesium strip production. The first model calculates the temperature distribution in the TRC magnesium coils during pre-heating process and after rolling. Furthermore, the extend first model will be included into the Hot Strip Rolling in order to analyze a temperature condition in coil during the rolling process. Additionally, in this model the microstructure influencing by deformation and heat treatment process will be further included. In this article, the concept of the model and current state of the work will be defined.

Магниевого сплавы являются одним из самым легкими конструкционным материалами с плотностью равной 1,74 г/см³. Магний на 30% легче алюминия и на 75% - стали. Кроме того магниевые сплавы обладают множеством положительных свойств, как электромагнитное экранирование, высокое соотношение между прочностью и плотностью, а также высоко экономичной вторичной переработкой. Данное сочетание свойств делает магниевые сплава привлекательным материалом, например, для автомобильной, авиа- и космической промышленности. К недостаткам магния относится то, что необходимые пластические свойства достигаются только при температурах выше 225 °C. Причиной этому является гексагональная кристаллическая структура магния. Выше 225 °C активируются дополнительные плоскости скольжения, что позволяет осуществлять пластические деформации.

По причине высокой стоимости исходного сырья применение магния в упомянутых промышленности возможно лишь за счет разработки новых экономических методов производства полуфабрикатов.

Данные условия не возможно достичь с помощью традиционных технологий. Например, путем отливки исходного материала в виде слэбов или блоков с последующей механической и термической обработкой.

В институте ОМД Фрайбергской горной академии (ФГА) совместно с MgF Magnesium Flachprodukte ThyssenKrupp была разработана новая стратегия производства магниевых полос. Данная стратегия состоит из технологии литья тонкой полосы в двухвалковом кристаллизаторе (TRC) и последующей реверсивной горячей прокатки. Данная технология позволяет обойти недостатки традиционной технологии и позволяет достичь производство

листовой полосы (полупродуктов) из магниевых сплавов более экономическим путем для широкого применения, например, в автомобильной промышленности.

Одним за важнейших инструментов для понижение издержек является моделирование отдельных технологических процессов производства прокатанной полосы с помощью численных методов (Метод Конечных Элементов (МКЭ)). Данный инструмент служит как для прогнозирования возможных свойств прокатанного материала, так и для управления и контроля отдельных стадий процесса.

Данная работа основывается на публикации[1] и в ее рамках рассматривается последующая обработка литой полосы. Кроме того, в работе представляется концепт численного моделирования горячей прокатки полосы из магниевых сплавов, стадии которого охватывают нагревание/термообработку рулона, реверсивную горячую прокатку и завершающую термообработку. В начальной стадии данной работы описываются процессы моделирования нагрева рулона.

Производство горячепрокатанной полосы из магниевого сплава

Технологическая цепочка производства магниевых полуфабрикатов в форме листовой полосы образуется из технологии литья тонкой полосы в двухвалковом кристаллизаторе (TRC), гомогенизирующего отжига и реверсивной горячей прокатки до необходимой конечной толщины полупродукта с заданными свойствами. На сегодняшний день минимальная достигаемая толщина составляет около 1 мм.

После нагревания рулона следующим этапом идет горячая прокатка. Исходный материал прокатывается в 3 или 5 прохода до конечной толщины. Отдельные стадии процесса представлены схематично на рис. 1.



Рис.1:Схематическая технологическая цепочка производства магниевой полосы.

В ходе отдельных стадий процесса наблюдается развитие микроструктуры. Различаются следующие типы:

- литая микроструктуры после TRC,

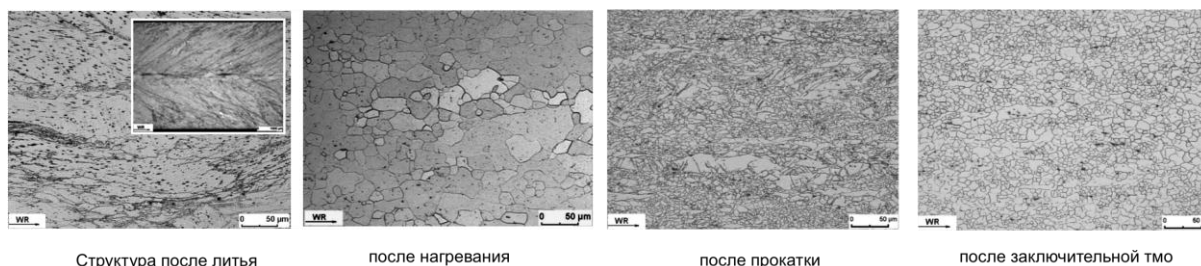


Рис. 2: Развитие микроструктуры в ходе технологического процесса.

Представленные стадии технологической цепочки (термообработка, реверсивная прокатка) производятся с помощью имеющихся машин в составе института. В распоряжении находится устройство TRC, специальная печь с циркуляцией

- с частичной деформацией в середине полосы с распознаваемой крупнозернистой структурой после термообработки,
 - деформируемая структура после прокатки,
 - мелкозернистая микроструктура после заключительной термообработки.
- Причем последняя термообработка применяется в том случае, если полная рекристаллизация не будет достигнута во время горячей прокатки.
- Изменение микроструктуры в ходе всего процесса отображается на рис.2.

атмосферой для нагрева и термообработки магниевого рулона и реверсивный 4-х валковый прокатный стан (рис.3). В таблице 1 резюмированы технические данные пилотных машин.



Рис. 3: Двухвалковое разливочное устройство TRC и 4-х валковый прокатный стан.
Таблица 1: Технические данные пилотных машин ТУ-Фрайберга.

	Двухвалковое разливочное устройство (TRC)	Реверсивный 4-валковый прокатный стан
макс.сила прокатки	7 МН	12 МН
макс.момент прокатки	200 кНм	130 кНм
макс.скорость прокатки	3 м/мин	225 м/мин
макс.ширина полосы	780 мм	720 мм
конечная толщина полосы	3-7 мм	≥1.0 мм
диаметр рабочих валков	840 мм	400 мм

Концепт моделирования производства полосы

Планирование и регулирование развития микроструктуры и механических свойств материала производится с помощью разработанных составляющих моделей:

- для нагрева / охлаждения рулона и
- для реверсивной горячей прокатки.

Конечная термическая модель должна охватывать развитие температурного профиля рулона во время процессов нагрева и охлаждения. К данной термической модели будут привязаны условия деформации, которые как и температура, являются основой для расчета развития микроструктуры. Данная термическая модель разрабатывается в 3D с помощью численных методов и МКЭ.

Концепт комплекса моделей схематично представлен на рис. 4.

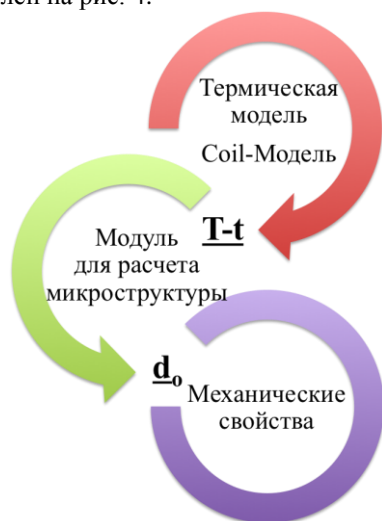


Рис. 4: Концепт комплекса моделей.

Первый модуль комплекса моделей является моделью охлаждения / нагрева рулоны. Построение Coil-модели производится с помощью численного метода МКЭ в 3D. Результаты данной модели получаются в виде данных температурного профиля рулона в зависимости от цикла нагрева или процессов охлаждения. Данные температурные профили служат в дальнейшем исходными данными для модуля расчета изменения микроструктуры. В данном модуле рассчитывается

кинетика микроструктурных изменений, с учетом которых производится расчет роста зерна, а также рекристаллизационная доля микроструктуры. При этом моделирование рекристаллизации производится с помощью JMAK модели для выявления размера рекристаллизационного зерна. В итоге, механические свойства материала могут быть коррелированы из смоделированного состояния микроструктуры.

Пример развития температуры в ходе нагрева сплава AZ31

В данном пункте речь пойдет о моделировании нагрева рулона в печи с циркуляционной атмосферой. Основа данной модели базируется на расчете температурного распределения в зависимости от времени по позиции в рулоне. При моделировании процесса нагрева и охлаждения прежде всего необходимо определить результирующий тепловой поток в рулоне (т.е. коэффициент теплопередачи) при определенных граничных условиях. В итоге, из того вытекает скорость нагрева или охлаждения рулона. При этом необходимо учесть зависимость теплоемкости, теплопроводности и плотности от температуры. Следующим основным фактором является расчет радиального коэффициента теплопроводности, т.к. намотанные витки рулона представляют собой слоистую структуру. Соприкосновение между витками является не сплошным, т.к. поверхность витков не идеальна и состоит из микроскопических поверхностных неровностей, что понижает общую контактную поверхность и, таким образом, осложняет теплопередачу.

С учетом важности данной темы многие ученые занимались этим вопросом. *Park и др.* учитывает данный момент за счет определения эквивалентного коэффициента теплопроводности. Похожий метод применяет *Saboonchiu др.* для моделирования нагрева рулонов в колпаковой печи. В данной модели также производится расчет эквивалентного коэффициента теплопроводности.

Модель и реализация численными методами

Модель рулона представлен на рис. 5. Для упрощения расчета, модель рулона рассматривается, как осесимметричное тело. Намотанные витки рулона рассматриваются, как

концентрированные витки. При этом в расчете учитывается половина рулона.

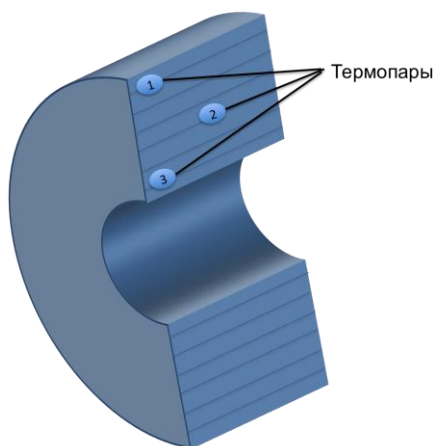


Рис. 5: Модель рулона с местоположением термодатчиков.

Уравнение нестационарной теплопроводности в цилиндрических координатах задается в следующей форме:

$$\lambda_r \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda_\theta \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

где T - температура; λ_r , λ_θ , λ_z - коэффициенты теплопроводности относительно направления в пространстве; ρ - плотность; C_p - теплоемкость. Осевой коэффициент теплопроводности принимается равным коэффициенту материала. В то время, как коэффициент теплопроводности в радиальном направлении определяется из структуры витков рулона, характеризующаяся контактной зоной.

Граничные условия модели рулона определены на внутреннем радиусе рулона нормалью, направленной в отрицательное радиальное направление,

$$\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} = q_c + q_r, \quad \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} = q_c + q_r \quad (2)$$

на внешнем радиусе нормалью в позитивное радиальное направление,

$$-\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} = q_c + q_r, \quad -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} = q_c + q_r \quad (3)$$

где q_c, q_r - конвективный тепловой поток и тепловой поток излучения.

Принимаемые начальные условия формируются из предыдущей стадии технологического процесса. Следовательно, выше представленная проблемы решается с помощью нестационарного МКЭ, которое формулируется следующим образом:

$$K \cdot T + C \cdot \dot{T} = F \quad (4)$$

где K , C - матрицы, характеризующие конечные элементы модели, F - вектор нагрузки.

Расчет радиального коэффициента теплопроводности с учетом поверхностных неровностей между витками.

Данная слоистая структура витков рулона преобразует данную проблему в анизотропную, т.е. определение теплопроводности в радиальном направлении должна производиться с учетом условий зоны контакта между витками. Данные условия являются термическими барьерами. Таким образом, расчет эквивалентного коэффициента теплопроводности происходит с помощью определения зоны контакта между витками. Рассматриваемая зона в области контакта состоит из 1/2 толщины одного витка, оксидной пленки, 1/2 толщины другого витка и непосредственно самой контактной поверхности. Схематично зона контакта представлена на рис.6. Теплопередача через зону контакта происходит за счет трех механизмов теплопередачи: теплопроводность, конвекции и излучения. Так как теплопроводность при прямом контакте является доминантным механизмом теплопередачи, остальные два механизма не будут рассматриваться при расчете.

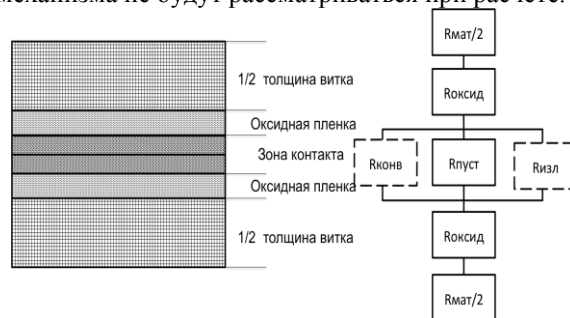


Рис. 6: Схема термического контакта между витками.

Характеристику теплопередачи между соседними слоями можно описать с помощью суммы барьеров в зоне контакта

$$R = R_{mat} + R_{оксид} + R_{пуст} \quad (5)$$

где $R_{mat}, R_{оксид}, R_{пуст}$ термический барьеры полосы, оксида и пустот. Данное выражение преобразуется в форме коэффициентов теплопроводности в следующий вид [2]:

$$\lambda_{eq}^i = \frac{(t_{mat} + t_{оксид} + t_{пуст}) \cdot \lambda_{mat} \lambda_{оксид} \lambda_{пуст}}{(t_{пуст} \lambda_{mat} \lambda_{оксид} + t_{mat} \lambda_{оксид} \lambda_{пуст} + 2 t_{оксид} \lambda_{оксид} \lambda_{пуст})} \quad (6)$$

где $\lambda_{mat}, \lambda_{оксид}, \lambda_{пуст}$ - коэффициенты теплопроводности материала, оксидной пленки и пустоты с учетом их толщин $t_{mat}, t_{оксид}, t_{пуст}$ (м). Таким образом, эквивалентный коэффициент теплопроводности принимается постоянным значением для всех витков. Определение параметров для расчета коэффициента теплопроводности для пустот описано в [4,5].

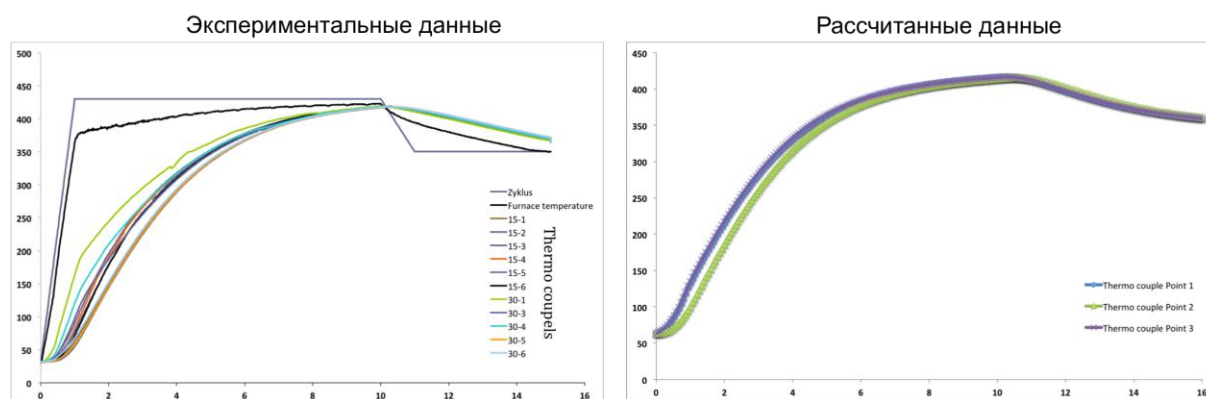


Рис. 7: Расчетные и эксперимент. результаты упрощенной модели

В независимости от представленной выше модели в институте ОМД ТУ-Фрайберга имеется упрощенная модель для расчета времени нагрева рулона в печи. Результаты расчета и экспериментальные данные измерения температуры представлены на рис.7. Они будут служить для оценки результатов расчетов с помощью МКЭ. Данная упрощенная модель описана в [6].

Заключение

В данной работе был представлен общий концепт подхода к моделированию производства полос из магниевых полученных путем литья тонкой полосы в двухвалковом кристаллизаторе. Данный комплекс моделей состоит из модуля расчета термических процессов, расчета развития микроструктуры и расчета механических свойств материала. В данной статье был представлен концепт для модуля термических расчетов и показаны результаты и экспериментальные данные из начальной стадии развития. Главная задача данного модуля является расчет нагрева рулона в печи.

Список литературы

1. Р. Кавалла, М. Ульманн, К. Шмидт, К. Нэ: Международная молодежная научно-практическая конференция, посвященная памяти чл.-корр. РАН, почетного доктора УрФУ В.Л. Колмогорова, Екатеринбург, (2013).
2. S. J. Park, B.-H. Hong, S. C. Baik and K. H. Oh: *ISIJ International*, **38** (1998), pp.1262.
3. A. Saboonchi and S. Hassanpour: *Journal of Materials Processing Technology*, **182** (2007), pp.101.
4. B. B. Mikic: *International Journal of Heat and Mass Transport*, **17** (1974), pp. 205.
5. M. R. Shridhar and M. M. Yovanovich: *Journal of Heat Transport*, **118** (1996), pp. 831.
6. J. Dembinska: Diplomarbeit: «Einfluss unterschiedlicher Gieß- und Vorumformbedingungen sowie Wärmebehandlung auf die Eigenschaften von Mg-Vorbandcoils und Tafeln», (2010), Institut of metal forming, TU-Freiberg